

基於ESP32 CSI 與LDA模型建立非侵入式廁所占用監測系統



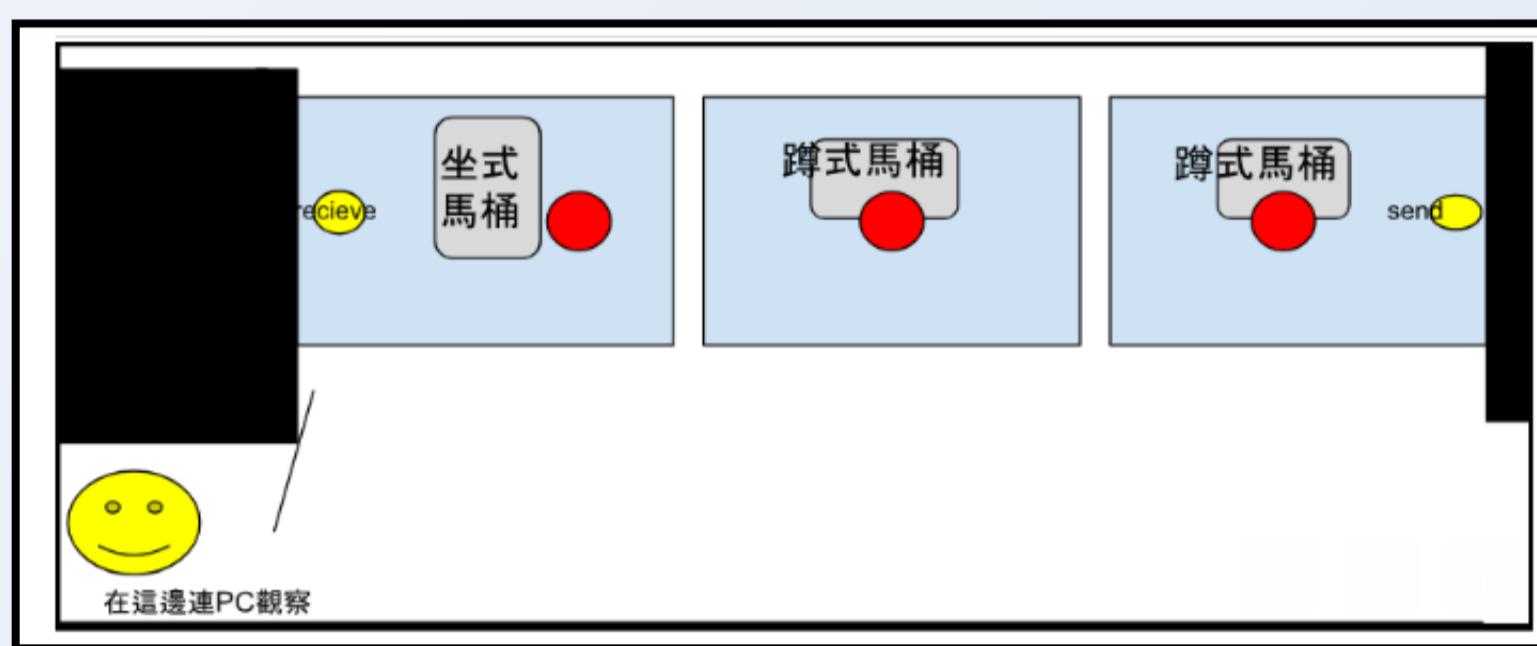
指導教授：李皇辰 教授

學生：楊盛安

摘要

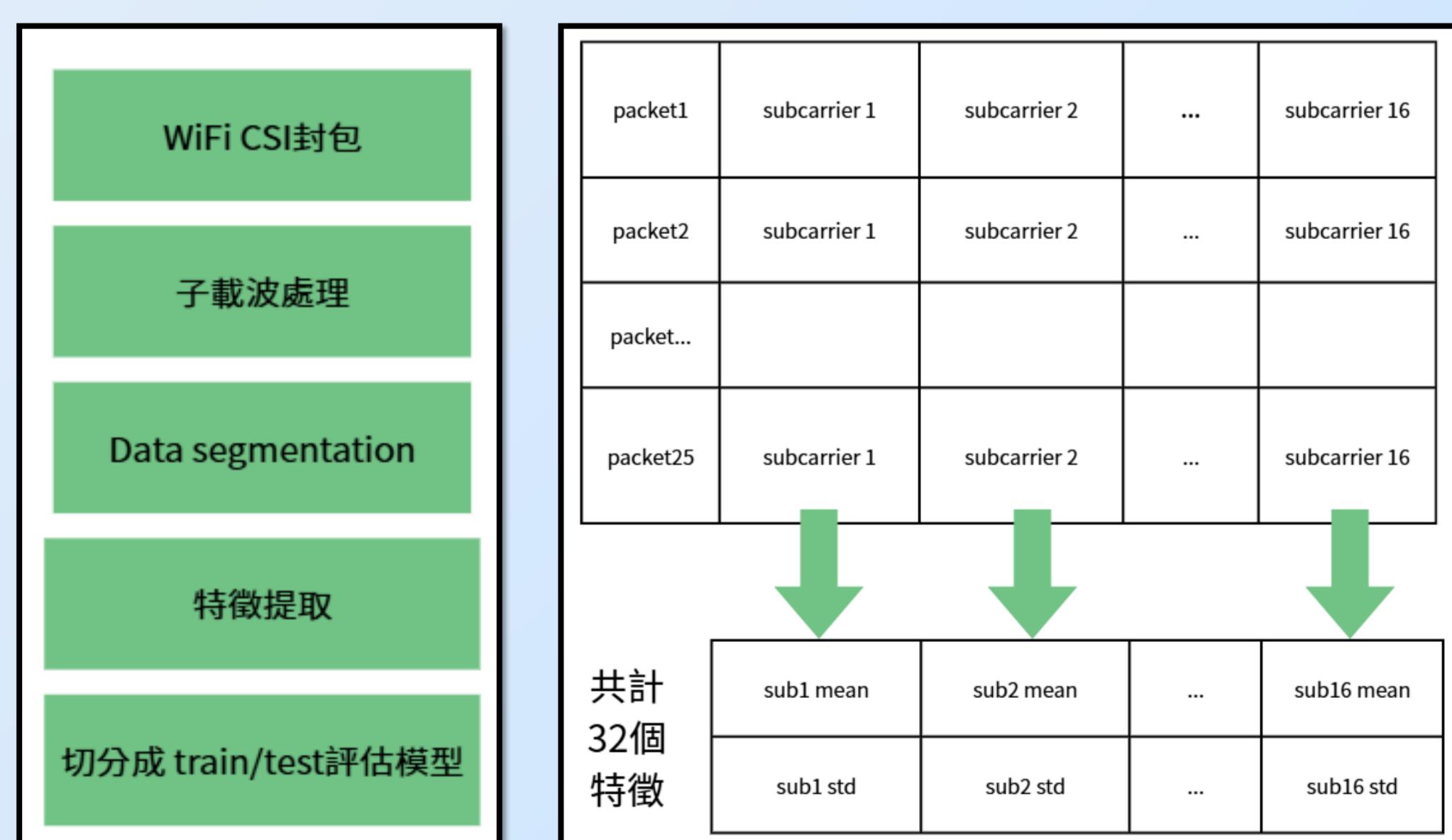
本研究以 ESP32 作為無線發送與接收端擷取 Wi-Fi 的CSI (Channel State Information)，並透過機器學習LDA模型分析CSI判斷廁所三個隔間中哪一間「有人」。期望建立一套非侵入式、低成本且可嵌入式運行的監測系統，能即時以CSI特徵分辨隔間佔用狀態，作為防範長時間逗留或異常事件的工具。

研究架構



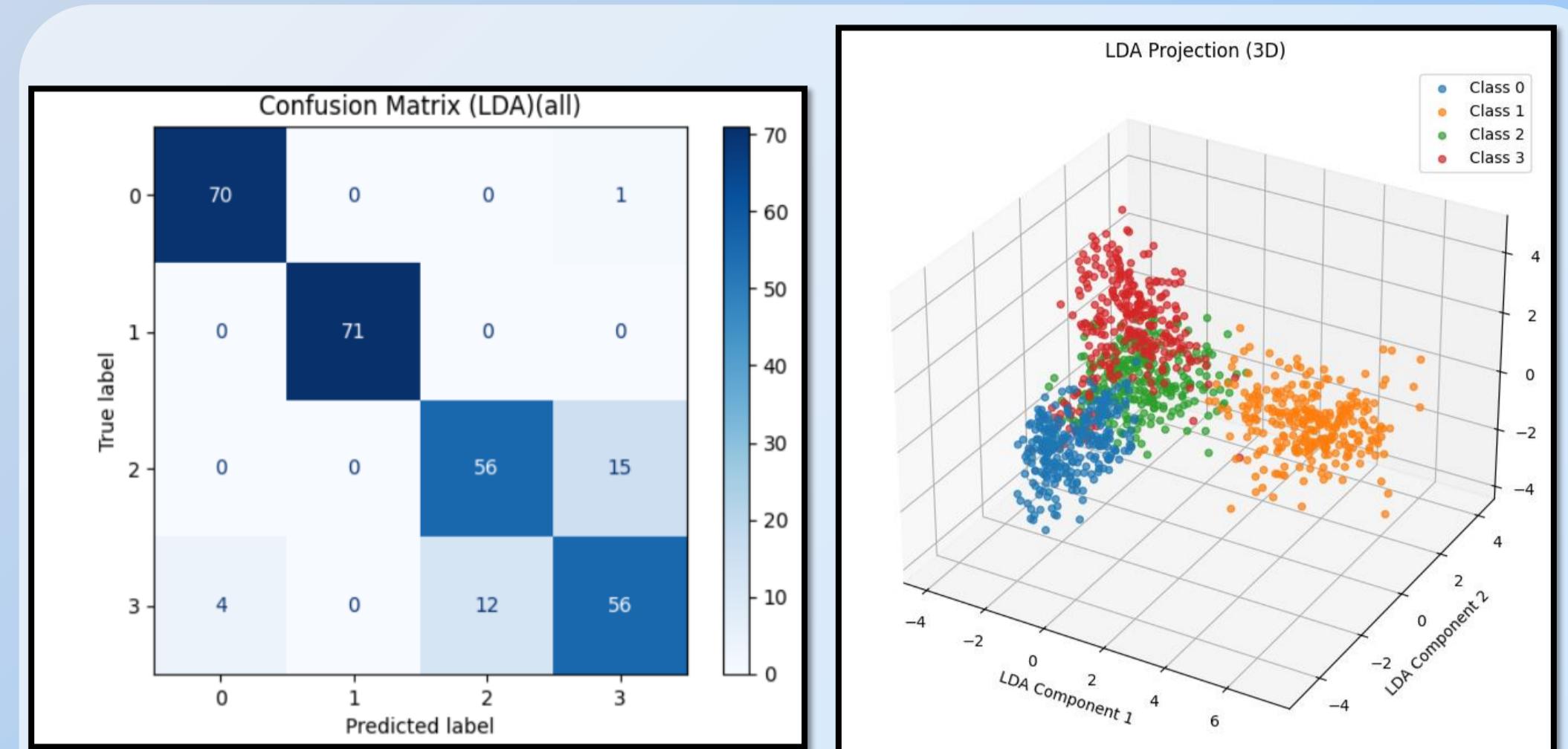
圖一：實驗配置圖

上圖為實驗配置。右邊是發射端，左邊連上PC觀察的是接收端，紅色點是人進去所在的位置。ESP32分別外接指向性天線，一端設成發送端(每秒發送5次)，一端設成接收端。發送端由行動電源供電，接收端連上PC觀察。各自放在兩側邊間，確保傳播路徑通過每間廁所如Fig 4.。為了要避免外在環境干擾，實驗採用指向性天線去觀察，讓傳播路徑限制在一條直線上。實驗資料共分為四種類別：(1)三間廁所皆無人；(2)第一間廁所有人；(3)第二間廁所有人；(4)第三間廁所有人。研究範圍僅針對單人佔用情境進行探討，未涉及多人同時存在的情況。由於CSI特徵容易受到環境變化影響，實驗分別於早上、中午與晚上三個時間段進行，以增加資料的多樣性。



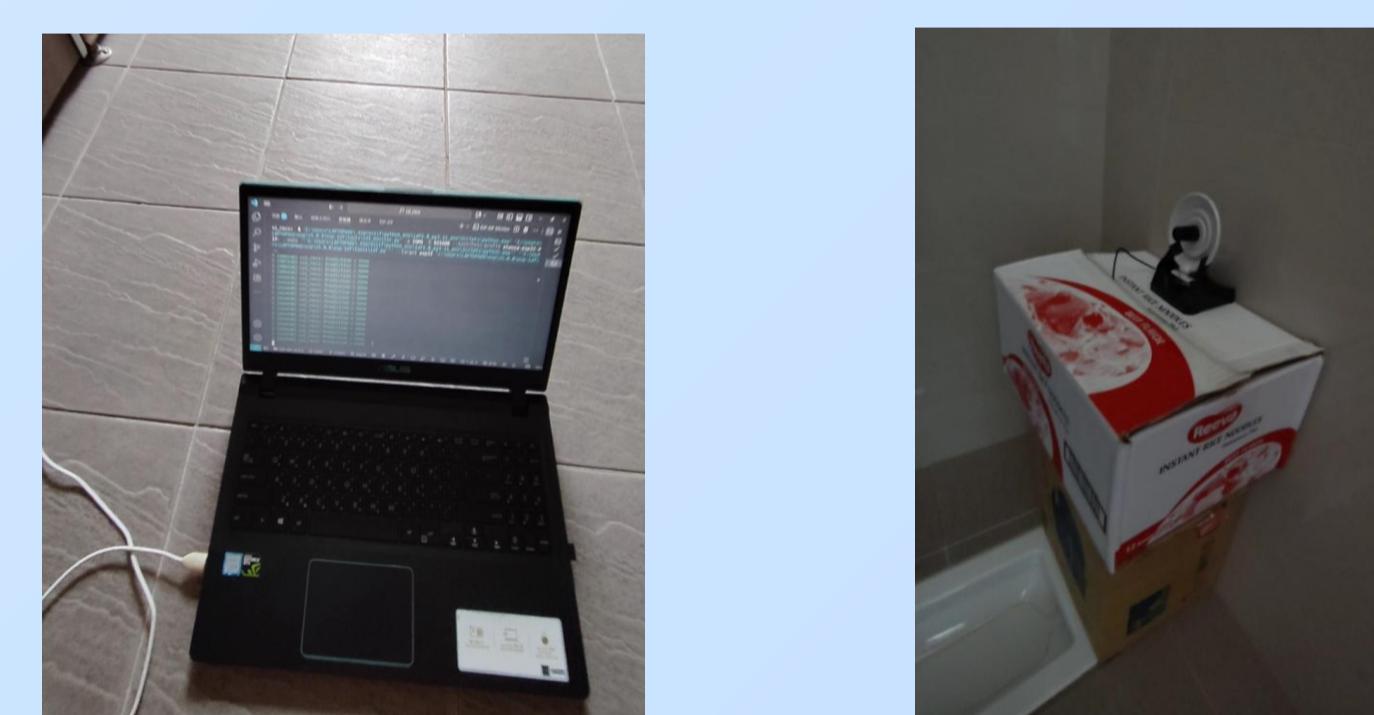
圖二：CSI數據預處理步驟和特徵提取方式

從ESP32取得CSI數據，在實驗中我將Wi-Fi設定在Channel 11、40 MHz 頻寬下接收封包。CSI在OFDM中的每個subcarriers是由實部與虛部組成，可轉換成振幅做觀察和特徵分析。在去除DC子載波、Guard Bands以及Pilot子載波後，本研究採用了滑動視窗的方法去切分資料並得出特徵。將連續的CSI資料按照固定長度的視窗進行切分，每25筆資料作為一個視窗，並且以一定的步長5筆資料進行滑動，產生多個具有時間連續性的資料片段。這樣的設計可以同時保留時間序列的動態變化。



圖三：用LDA分析特徵後的混淆矩陣和LDA降維
0代表三間廁所皆無人、1代表第一間廁所有人、
2代表第二間廁所有人、3代表第三間廁所有人。
可以觀察到二三間誤判的機率較大。

上圖將處理完的CSI特徵參考論文選擇LDA (Linear Discriminant Analysis) 作為CSI資料的機器學習模型。實驗場景為單人使用的廁所隔間，分類目標僅限於「無人」與「有人」的狀態，因此資料具備明顯的類別區隔特性。LDA建立於Fisher判別準則的基礎上，透過最小化類別內的變異 (within-class scatter) 並同時最大化類別間的變異 (between-class scatter)，能有效分類不同狀態下的CSI特徵。這樣的特性特別適合應用於CSI訊號分類，因為CSI在有人與無人情境下會呈現顯著的變化，而LDA可將這些差異投影至最佳的低維度空間，進而實現高效且準確的分類。將上述切分處理完的特徵序列分成八比二的訓練集和驗證集，最後以圖三準確率分類報告和混淆矩陣評估模型效能達到準確率88.7%。



圖四：即時分析將LDA模型參數放入ESP32，並在ESP32對每次收進來的CSI數據同樣進行上述一連串的即時處理，包括重新排序、去除無效子載波、取區間、切分成window、取特徵，透過模型判斷出最佳解。

結論與未來展望

本研究以CSI資料配合LDA模型，驗證了在單人使用的廁所隔間環境中，能有效區分「有人」與「無人」狀態。然而，仍存在若干限制與挑戰。未來工作可從以下方向進行：首先，應探討如何解決偵測範圍限制，需要想辦法增加偵測範圍。其次，增加樣本數擴充資料來源，能提升模型的泛化能力與穩定性。再者，需觀測多人同時存在的情境，以檢驗模型在複雜場景下的判斷能力，避免因訊號疊加或干擾導致分類失準。最後，亦可嘗試引入更多樣的特徵或改變區間的取法，亦可加入RSSI以進一步提升系統在實際應用中的實用性。